

José Sena Cruz
Assistente
Univ. do Minho

Joaquim Barros
Prof. Auxiliar
Univ. do Minho

Raimundo Delgado
Prof. Agregado
FEUP

Aníbal Costa
Prof. Auxiliar
FEUP

Análise Experimental de Elementos de Viga de Betão Armado Reforçado com Fibras de Aço sob Acções Cíclicas

Resumo

Com o objectivo de avaliar a influência das fibras de aço no comportamento de vigas de betão armado submetidas a acções cíclicas, realizaram-se ensaios cíclicos com elementos de viga reforçadas com três percentagens de armadura transversal e quatro de fibras. São descritos os ensaios, e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Abstract

In order to evaluate the influence of the steel fibres in the behaviour of reinforced concrete beams under cyclic loadings, it was carried out quasi-static tests with beams reinforced with three percentages of conventional transverse reinforcement and four contents of steel fibres. The tests are described and the main results are presented and discussed.

1. INTRODUÇÃO

O betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é um material de matriz cimentícia a cuja composição é adicionada determinada percentagem de fibras discretas. A adição de fibras a materiais frágeis remonta à época dos Romanos e dos Egípcios, sendo exemplo disso o reforço de pastas de argila com fibras naturais. Apesar do betão ter surgido no século passado, somente a partir da metade do corrente século é que os betões com adição de fibras começaram a ser utilizados em aplicações da indústria da construção civil. As fibras mais utilizadas têm sido as metálicas, as de vidro, as sintéticas, as naturais e, mais recentemente, as de carbono. Todavia, as fibras de aço e de vidro são as mais empregues na indústria da construção civil devido à melhoria de propriedades que proporcionam, ao seu baixo preço e à sua durabilidade [1,2].

A capacidade de absorção de energia é a propriedade mais beneficiada pela adição de fibras a materiais de matriz cimentícia. Este benefício tem importância acrescida nas estruturas submetidas a acções cíclicas, dado haver maior quantidade de energia para dissipar [3], resultando um comportamento mais dúctil e uma maior segurança estrutural.

Nos últimos anos tem havido grande interesse por parte da comunidade científica em procurar estudar este tipo de compósitos. Contudo, o conhecimento deste material sob acções cíclicas é ainda reduzido. Este trabalho pretende dar um contributo para o conhecimento do betão reforçado com fibras sujeito a acções cíclicas.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOS ELEMENTOS ENSAIADOS

2.1 Fibras

Neste trabalho utilizou-se fibras de aço designadas comercialmente por *Dramix* ZP30/.50 [4]. As fibras têm uma esbeltez, l_e , de 60 (comprimento da fibra/diâmetro da fibra). Estas fibras apresentam uma massa volúmica de 7.8 g/cm^3 , resistência à tracção de 1250 MPa, módulo de elasticidade longitudinal de 200 GPa e uma extensão última de 3 a 4 %.

2.2 Betões

Na Tabela 1 apresenta-se a composição utilizada no fabrico dos betões. Mais pormenores sobre a composição, o método de amassadura e avaliação da trabalhabilidade dos betões confeccionados poderão ser encontrados noutras publicações [5,6]. Na Tabela 2 apresenta-se a resistência à compressão, f_{cm} , o módulo de elasticidade inicial, E_{ci} , e o módulo de elasticidade secante, E_{cl} , [5] registados nos ensaios de compressão com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A descrição da confecção dos provetes, do equipamento e dos

procedimentos de ensaio poderá ser encontrada noutra publicação [5].

Tab. 1: Composição utilizada na confecção dos betões

Elemento	Areia (0-3 mm)	Brita (3-15 mm)	Cimento	Água	Fibras
Composição (kg/m ³)	729	1000	450	202.5	0, 30, 60, 90

Tab. 2: Resistência à compressão e módulos de elasticidade nas séries ensaiadas

Propriedade	0 kg/m ³	30 kg/m ³	60 kg/m ³	90 kg/m ³
f_{cm} (MPa)	36.1	33.9	34.4	33.5
E_{ci} (GPa)	31.9	25.1	26.0	27.2
E_{cl} (GPa)	20.9	16.6	15.4	15.0

2.3 Armaduras

Nos ensaios efectuados recorreu-se a dois tipos distintos de armadura: $\phi 3$ e $\phi 8$. Com vista à caracterização da armadura efectuaram-se ensaios de tracção uniaxial, apresentando-se na Tabela 3 valores médios referentes às principais características da resposta dos varões [5].

Tab. 3: Principais características das armaduras utilizadas

Varão	Extensão de cedência (%)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Extensão de rotura (%)
$\phi 3$	0.111	175.0	288.0	57
$\phi 8$	0.215	430.0	528.0	18.0

2.4 Modelos de viga

As vigas tinham dimensões de 75×160×1600 mm³ (largura×altura×comprimento). A betonagem dos modelos de viga foi feita retirando-se betão da betoneira e colocando-o nos moldes de aço com auxílio de colheres de trolha. Todos os modelos foram compactados em mesa vibradora com o objectivo de eliminar “chochos”, expelir “bolhas” de ar e contribuir para uma distribuição homogénea das fibras na mistura. O processo de cura dos provetes

envolveu os seguintes passos: após serem betonados, os provetes foram colocados durante uma semana em câmara húmida; ao fim dessa semana foram descofrados e foram imersos em água até aos 28 dias; findo este tempo, os provetes foram retirados da água, tendo sido colocados em câmara húmida até uma semana antes de serem ensaiados.

2.5 Pormenorização das armaduras

Na face superior e na face inferior dos elementos de viga dispõe-se de 3 ϕ 8 (ver Figura 1) constituindo uma percentagem de armadura de 1.4 %.

Consideram-se três distintas quantidades de armadura transversal: estribos afastados de 750, 150 e 75 mm. Com esta percentagem de armadura transversal pretendia-se promover a ocorrência de roturas por corte. Na Figura 1 ilustra-se a secção transversal das vigas ensaiadas. Definiu-se percentagem de armadura transversal, ρ_w , como sendo a razão entre o volume de estribos e o volume de betão interno aos estribos, por unidade de comprimento da viga.

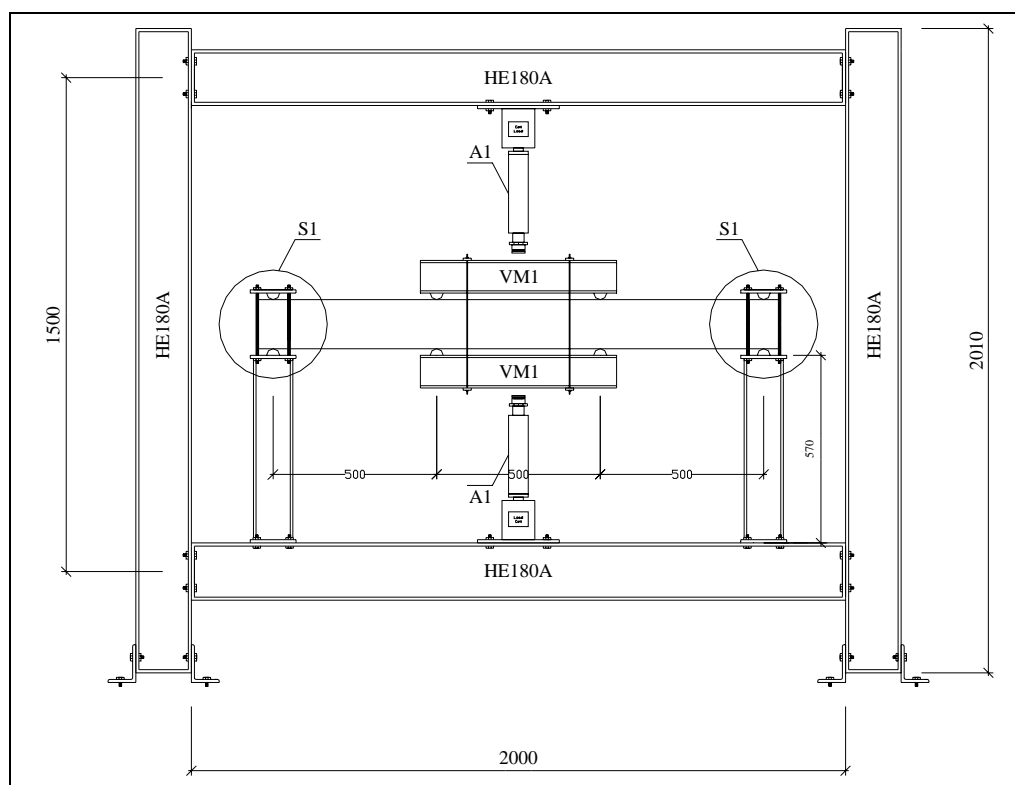
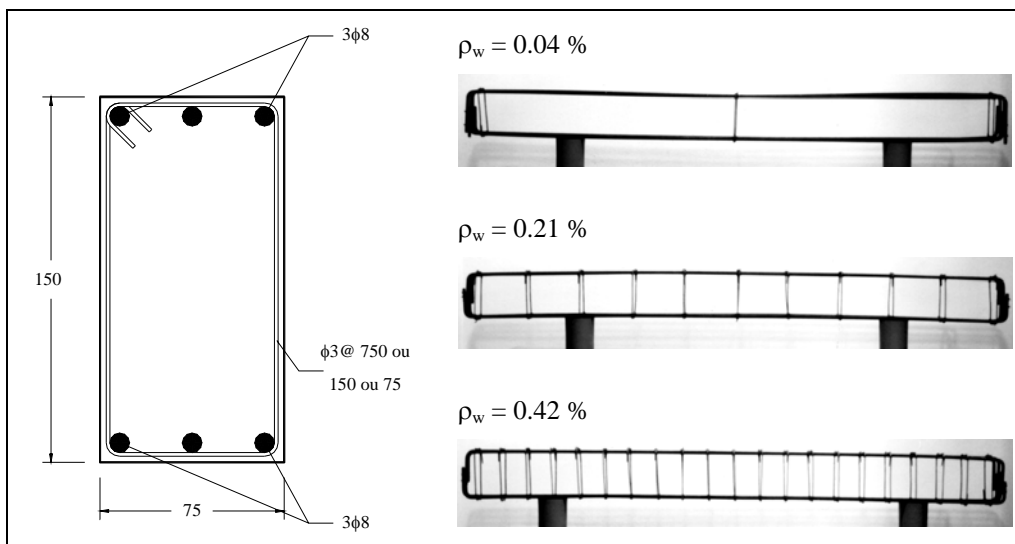
3. MÉTODOLOGIA UTILIZADA NOS ENSAIOS

3.1 Configuração dos ensaios

A estrutura de reacção utilizada nos ensaios quase-estáticos encontra-se representado na Figura 2. É possível observar que os modelos encontravam-se apoiados através de um sistema de suportes S1, sendo a carga aplicada às vigas por intermédio de actuadores A1 decomposta em cargas aplicadas aos terços da viga utilizando-se vigas metálicas VM1 (ver Figura 2).

3.2 Instrumentação

A instrumentação das vigas foi efectuada por intermédio de transdutores de deslocamentos, extensómetros de massa e células de carga. Os transdutores de deslocamentos, com um campo de leitura com uma amplitude linear de ± 25 mm, foram posicionados de forma a serem registados os deslocamentos verticais de pontos afastados entre si de 250 mm, dispostos ao longo do eixo da viga. Para avaliar as extensões médias nas armaduras e calcular a curvatura na secção de meio vão, utilizaram-se dois extensómetros de massa, posicionados a meio do vão da viga. A distância entre pontos fixos dum extensómetro de massa foi de 100 mm e seu campo de leitura linear era de ± 4 mm. A força transmitida pelo actuador às vigas era medida por intermédio de uma célula de carga com uma capacidade máxima de carga de 50 kN.



3.3 Lei de deslocamentos

Na Figura 3 ilustra-se a história de deslocamentos alternados impostos a meio vão para todas as vigas ensaiadas. Esta história foi definida com base no deslocamento de cedência, δ_y . Neste trabalho δ_y foi estimado numericamente [7], tendo-se obtido o valor de 6.25 mm. O ensaio terminava quando toda a lei de deformações era executada ou ocorria rotura frágil.

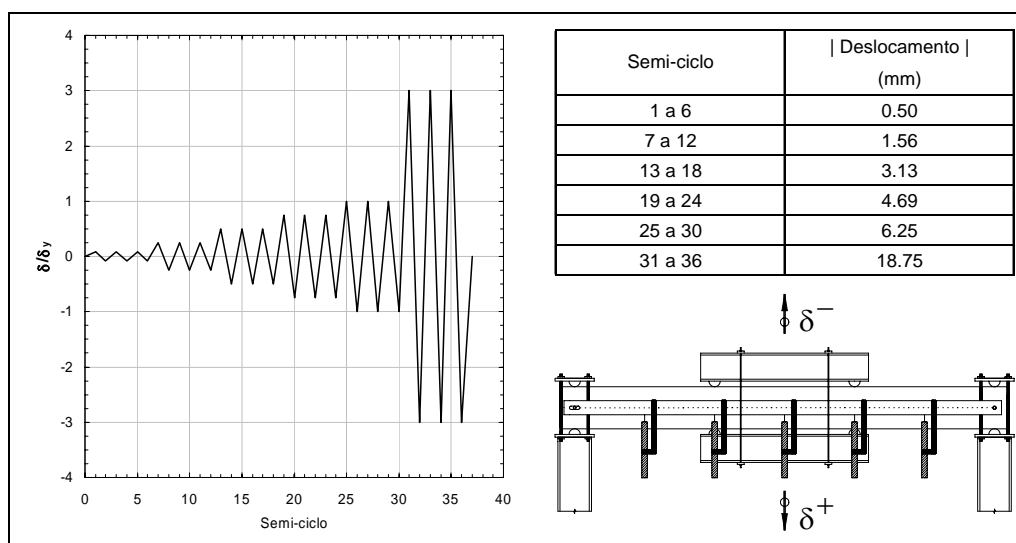


Fig. 3: Lei de deslocamentos impostos

3.4 Procedimento do ensaio

O ensaio era iniciado com o sistema totalmente descarregado. A carga era aplicada de uma forma quase-estática, procurando-se alcançar o deslocamento máximo estabelecido para cada semi-ciclo. Por vezes excedeu-se o deslocamento previsto, ou ficou ligeiramente aquém do pretendido devido ao facto de ser difícil cumprir com rigor a lei de deslocamentos pretendida, quando se utiliza um sistema manual de aplicação da carga.

4. RESULTADOS

Durante o decorrer dos ensaios foi possível constatar alguns aspectos que se consideraram relevantes, nomeadamente:

- ocorreram roturas por corte, por flexão e por flexão-corte. A rotura frágil por corte ocorreu apenas em três vigas (com $\rho_w=0.04\%$): nas duas vigas sem fibras e numa das vigas com 30 kg/m^3 de fibras. A rotura por flexão ocorreu em todas as vigas com fibras e

estribos afastados de 75 mm. Nestas vigas a armadura longitudinal plastificou. O modo de rotura flexão-corte ocorreu nas restantes vigas, em que numa fase inicial houve a cedência das armaduras longitudinais, após a qual, se seguiu o desenvolvimento de fendas de corte que conduziram à rotura por corte;

- com o aumento da quantidade de fibras, a fendilhação tornava-se mais densa. Este fenómeno está relacionado com o facto das fibras constituírem um reforço mais homogéneo promovendo uma melhor distribuição de tensões e das fendas;
- a fendilhação iniciou-se sempre devido a esforços de flexão. Para níveis de deformação superiores, a fendilhação intensificou-se quer em quantidade, quer em profundidade. Após a entrada em cedência da armadura, a fendilhação passou a concentrar-se na zona da plastificação da armadura, entrando as restantes fendas em descarga. Por vezes, verificou-se a “rotação” das fendas de corte; as fendas de flexão concentraram-se, preponderantemente, na zona de esforço transversal nulo - flexão pura - entre pontos de aplicação da carga, sendo nessa zona que se deu a cedência da armadura; as fendas de corte apareceram nas zonas compreendidas entre os pontos de aplicação da carga e os apoios, zona essa onde se deu a rotura das vigas que romperam por corte;
- nas vigas que romperam por corte, a fragilidade da rotura diminuía com o aumento da percentagem de fibras. Nas vigas com $\rho_w=0.04\%$, sem fibras, a rotura deu-se sem aviso prévio, enquanto nas vigas do mesmo grupo, mas com fibras, foi sempre possível visualizar a formação do mecanismo de rotura; em alguns casos constatou-se o destaque do betão de recobrimento.

Na Figura 4 apresenta-se uma fotografia referente ao ensaio da segunda viga, com $\rho_w=0.42\%$ e $Q_f=30\text{kg/m}^3$, durante o semi-ciclo 36.



Fig. 4: Nível de fendilhação atingido no semi-ciclo 36 para a segunda viga com $\rho_w=0.42\%$ e $Q_f=30\text{kg/m}^3$

Para cada modelo procurou obter-se relações força-deslocamento, momento-curvatura, energia total-deslocamento acumulado, ductilidade - semi-ciclo e extensão média ao nível da armadura superior e inferior, para a secção de meio vão [5]. Na Figura 5(a) a título ilustrativo apresenta-se a relação força-deslocamento para a segunda viga com $\rho_w=0.42\%$ e $Q_f=30\text{kg/m}^3$. Nas Figuras 5(b), 5(c) e 5(d) apresentam-se os valores da carga de fendilhação, da carga de cedência e da carga de rotura, respectivamente, para todos os ensaios efectuados.

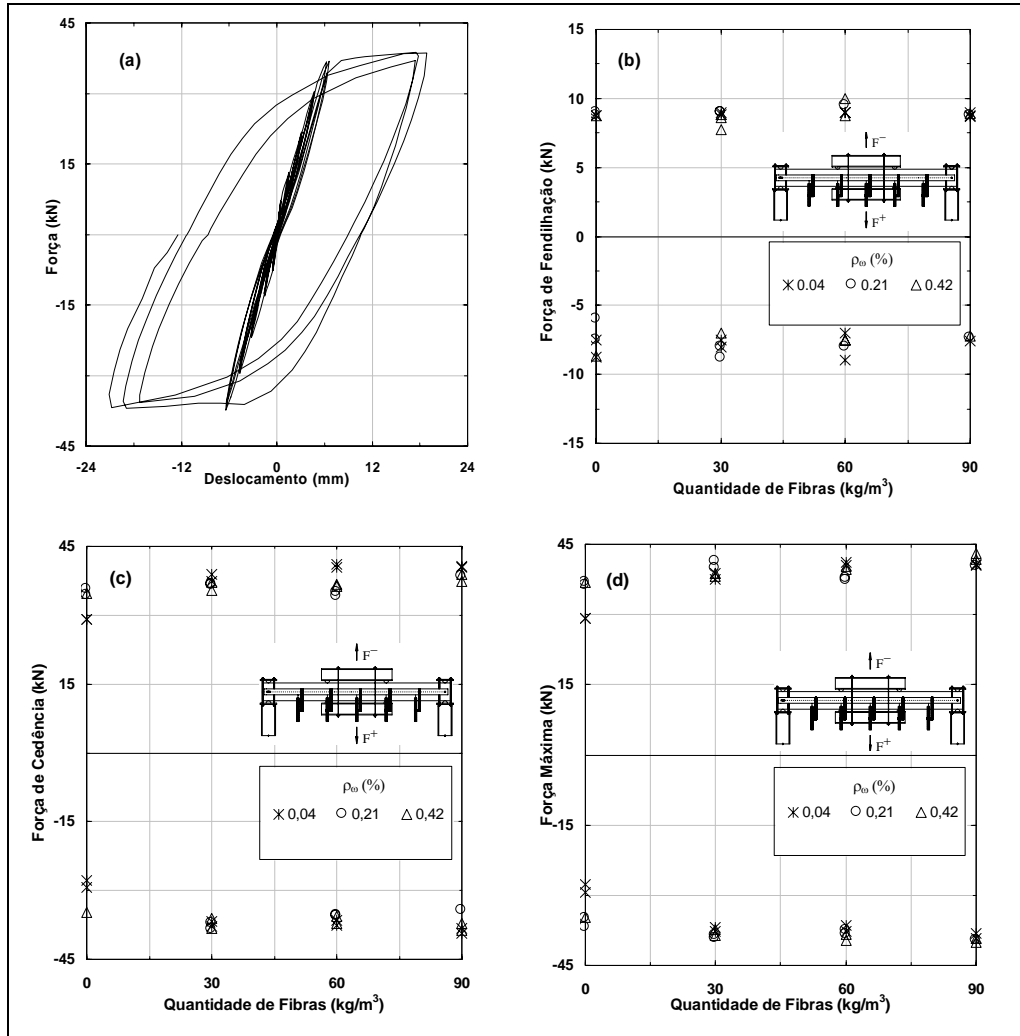


Fig. 5: (a) diagrama força-deslocamento da segunda viga com $\rho_w=0.42\%$ e $Q_f=30\text{kg/m}^3$; carga de fendilhação (b), de cedência (c) e máxima (d) para cada viga em função de Q_f e ρ_w

A partir das figuras é possível concluir que a carga de fendilhação se mantém relativamente insensível à quantidade de fibras e à percentagem de armadura de esforço transversal utilizada. Nas vigas com 60 kg/m^3 de fibras ocorre uma dispersão significativamente superior à registada nas restantes vigas. A justificação para este fenómeno poderá ser encontrada noutra publicação [5]. Observando os resultados relativos à força de cedência e à carga última, constata-se que estas crescem ligeiramente com o aumento da quantidade de fibras. A partir dos diagramas de extensão média ao nível das armaduras foi possível verificar a ocorrência de extensões da ordem dos 5 a 6×10^{-3} [5].

Para ilustrar a eficiência do reforço conjugado da armadura transversal e das fibras em termos de ductilidade e energia total, seleccionaram-se os resultados obtidos em uma das duas vigas de cada série. A energia total e a ductilidade foram definidos a partir dos diagramas força-deslocamento a meio vão. Nas Figuras 6(a) e 6(b) apresentam-se, a título exemplificativo, diagramas de energia total e ductilidades, respectivamente.

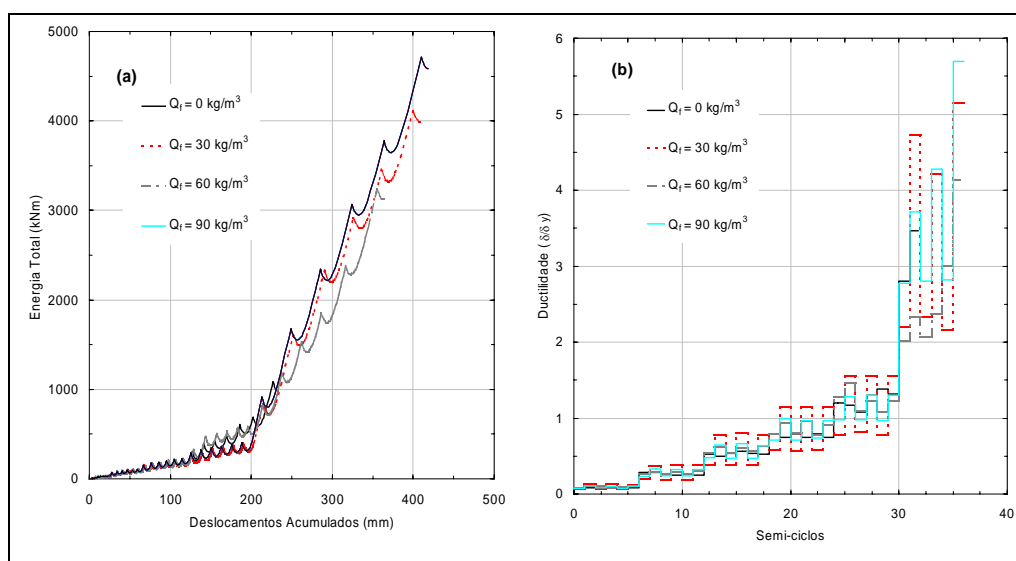


Fig. 6: Diagrama de energia total (a) e diagrama de ductilidades (b) para os ensaios das séries com $\rho_w=0.42\%$

A partir dos diagramas de energia total verificou-se que, de um modo geral, com o aumento da quantidade de fibras a energia dissipada aumentava. Foi possível observar que os modelos sem fibras evidenciaram uma capacidade de absorção de energia diminuta, resultante da ocorrência da rotura por corte para valores menores de carga aplicada. Algumas vigas reforçadas com 60 kg/m^3 de fibras apresentavam, numa fase inicial, uma menor capacidade de dissipação de energia (comparativamente com os restantes modelos). Contudo, para níveis de deformação superiores acabavam por recuperar esse “atraso”. As vigas com $Q_f = 90 \text{ kg/m}^3$ foram as que revelaram maior capacidade de absorção de energia, sendo esta, significativamente superior às vigas sem fibras. Verificou-se ainda que, com o aumento da percentagem de armadura de esforço transversal (estribos), os modelos têm maior capacidade de dissipação de energia. Por último, será de referir que os modelos sem fibras e com estribos afastados de 75 mm tiveram pior comportamento que os modelos com estribos afastados de 750 mm e $Q_f = 60$ e 90 kg/m^3 , o que revela que as fibras têm potencial aplicação no reforço de estruturas submetidas a esforço transversal elevado.

A partir dos diagramas de ductilidades verificou-se que, com o aumento da quantidade de fibras, os valores de ductilidade crescem, observando-se que os maiores níveis de ductilidade são conseguidos para os modelos com $Q_f = 90 \text{ kg/m}^3$. Verifica-se que o aumento da percentagem de estribos conduz, igualmente, a modelos com maior ductilidade. Particularmente notório é o facto de, para a mesma quantidade de armadura transversal, os modelos sem fibras apresentarem menos de metade da ductilidade dos modelos com $Q_f = 90 \text{ kg/m}^3$.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi descrito o estudo experimental efectuado com modelos de viga sujeitos a cargas alternadas, reforçados com diferentes quantidades de fibras e armadura transversal. Em termos gerais verificou-se que a adição de fibras permite aumentar ligeiramente a capacidade última de carga das vigas. Com o aumento da quantidade de fibras e de estribos obteve-se modelos mais dissipativos e com ductilidade superior. Verificou-se que as fibras contribuem para o aumento da resistência aos esforços transversos, sendo possível fazer uma substituição parcial da armadura de esforço transverso por fibras de aço. Este potencial pode ser utilizado, por exemplo, na pré-fabricação de peças de elevada complexidade geométrica, onde é difícil a aplicação de estribos. A questão que reside é saber se o emprego do betão armado reforçado com fibras aplicado a estruturas porticadas é económico. Este tema merece um plano de investigação abrangendo os domínios envolvidos.

Referências

- [1] ACI 544.1R-96; “*State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*”, ACI Manual of concrete Practice – Part 5 – ACI International, 1997.
- [2] Barros, J.A.O.; “*Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*”, Tese de Doutoramento, FEUP, 1995.
- [3] Gomes, A.M.; “*Comportamento e reforço de elementos de betão armado sujeitos a acções cíclicas*”, Tese de Doutoramento, UTL, 1991.
- [4] Bekaert Specification; “*Dramix fibres hors fils d’acier pour reinforcement de béton et mortier*”, Bekaert N.V., 1991.
- [5] Cruz, J.M.S.; “*Comportamento cíclico de estruturas porticadas de betão armado reforçadas com fibras de aço*”, Tese de Mestrado, FEUP, 1998.
- [6] Barros, J.A.O.; Cruz, J.M.S.; Delgado, R.M.; Costa, A.G.; “*Análise experimental de elementos de betão armado reforçado com fibras sob acções cíclicas*”, JPEE’98, 1998.
- [7] Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A.; “*Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete: testing and modelling*”, a editar no Journal of Materials in Civil Engineering em Outubro de 1999.